

## ANÁLISIS NUMÉRICO DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE ARCOS Y BÓVEDAS DE MAMPOSTERÍA EN EDIFICIOS PATRIMONIALES HISTÓRICOS

### ANALYSIS OF THE STRUCTURAL BEHAVIOR OF MASONRY ARCHES AND VAULTS IN HISTORICAL HERITAGE BUILDINGS

**Guadalupe Moreno, Martín Almenar y Sergio Gutierrez**

*Instituto de Estructuras “Ing. Arturo M. Guzmán”, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología,  
Universidad Nacional de Tucumán. Av. Independencia 1800. S.M. de Tucumán, Argentina,  
malmenar@herrera.unt.edu.ar <https://www.facet.unt.edu.ar/iest>*

**Palabras clave:** Arcos de mampostería, Bóvedas de mampostería, Edificios históricos,  
Método de elementos finitos.

**Resumen.** Los edificios históricos representan una parte fundamental del patrimonio cultural. El método de los elementos finitos es una herramienta invaluable para abordar distintos estados de carga, modelar geometrías complejas de estructuras de mampostería (bóvedas, arcos, pilares), y simular efectos no lineales, tanto en el material como en la geometría. En este trabajo, se utiliza la herramienta computacional Ansys Workbench. Se modelan numéricamente casos típicos de arcos y se estudian casos complejos de arcos y bóvedas a fin de obtener una noción más realista del comportamiento estructural que estos elementos presentan al ir complejizando su forma. Finalmente, se analiza un caso de estudio de una bóveda de mampostería. Se obtiene un mapa de deformaciones plásticas coherentes con estados de fisuración causados por el estado de carga de peso propio y un eventual asentamiento de las cimentaciones.

**Keywords:** Masonry arches, Masonry vaults, Historic buildings, Finite element method.

**Abstract.** Historic buildings represent a fundamental part of cultural heritage. The finite element method is an invaluable tool to address different loading states, model complex geometries of masonry structures (vaults, arches, pillars), and simulate non-linear effects, both in material and geometry. In this work, the Ansys Workbench computational tool is used. Typical cases of arches are numerically modeled and complex cases of arches and vaults are studied in order to obtain a more realistic notion of the structural behavior that these elements present as their shape becomes more complex. Finally, a case study of a masonry vault is carried out. A map of plastic deformations consistent with cracking states caused by the state of self-weight loading and eventual settlement of the foundations is obtained.

## 1 INTRODUCCIÓN

La conservación de los edificios patrimoniales es esencial para salvaguardar tanto la herencia cultural como su legado técnico constructivo. El material con el que comúnmente se ejecutaron estas obras es la mampostería, un material con propiedades mecánicas marcadamente heterogéneas lo cual hace que su estudio sea un caso particular por demás desafiante e interesante.

Este trabajo realiza un análisis estructural de elementos de mampostería presentes en edificios patrimoniales, abordando diversas configuraciones estructurales de arcos y bóvedas mediante modelos numéricos, permitiendo la interpretación detallada de su comportamiento estructural.

A través de estos modelos numéricos, además, se realiza un análisis exhaustivo de tensiones y deformaciones en una estructura de mampostería existente, que exhibe ciertos niveles de fisuración. Esta estructura específica corresponde a la bóveda de la Sacristía del Templo de San Francisco, en la Ciudad de San Miguel de Tucumán, provincia de Tucumán. El objetivo principal es evaluar el estado estructural actual mediante modelos numéricos específicos para esta bóveda de mampostería en particular.

## 2 ANÁLISIS DE ARCOS DE MAMPOSTERÍA.

### 2.1 Arco de medio punto

Como primera medida se estudió el caso del arco de medio punto, el cual constituye un caso típico y su resolución analítica puede encontrarse en la bibliográfica clásica. Este mismo arco se modeló numéricamente, con el fin de comprobar la herramienta numérica Ansys Workbench comparando los resultados. Para este desarrollo se consideró un arco con las características geométricas y de carga que se aprecian en la [Figura 1](#). Se adoptó una sección transversal cuadrada de 20 cm de lado. Se sometió al arco a su peso propio  $q$ , siendo el mismo una carga vertical uniformemente distribuida que puede calcularse a partir del peso específico adoptado para la mampostería 1800 Kg/m<sup>3</sup>. Las características elásticas adoptadas para el material son, el módulo elástico de 3200 Mpa y el coeficiente de Poisson de 0,30. El peso específico y propiedades elásticas antes mencionados se usará en todos los modelos de este trabajo.

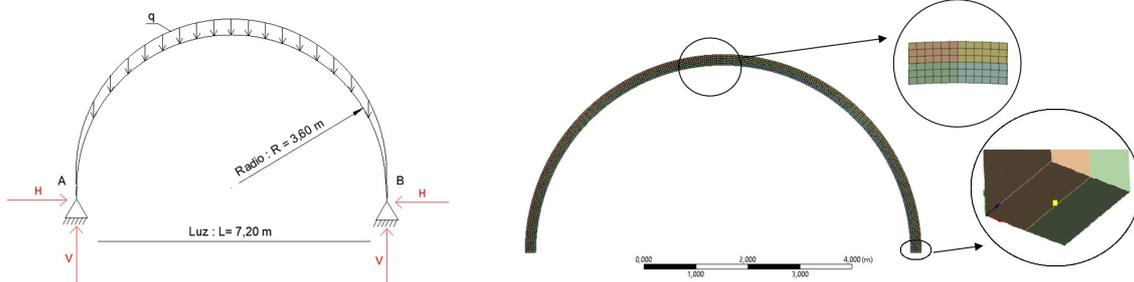


Figura 1: Esquema del arco de medio punto. Figura 2: Malla de elementos finitos y condiciones de apoyo.

Para el modelo numérico se adoptaron elementos sólidos hexaédricos de 6 nodos con 6 grados de libertad (3 de desplazamiento), utilizando un tamaño de elementos de 4cm. Estas características de elemento finito se usarán en todos los modelos de esta sección. Para poder representar las condiciones de apoyo, y permitir el giro, se impidieron los desplazamientos en la línea central de la cara del apoyo. Lo antes descrito se observa en la [Figura 2](#). En la [Tabla 1](#), se pueden apreciar los resultados obtenidos del modelo analítico y numérico, en

encontrando una buena correlación.

Valores	Analítico	Computacional
Reacción Vertical: V [N]	4103,75	4103,70
Reacción Horizontal: H [N]	1306,26	1305,80
Desplazamiento en la clave [m]	-4,29E-3	-4,32E-03
Tensión en la clave: $\sigma$ [Pa]	-5,32E+05	-5,38E+05

Tabla 1: Comparación del arco de medio punto analítica vs. Computacional.

## 2.2 Arcos Ojivales

En base al análisis previo, se procedió a desarrollar numéricamente otros dos tipos de arcos: ojival y ojival rebajado. En las Figuras 3 y 4 se pueden apreciar las geometrías, y deformadas de los arcos ojivales. En la [Tabla 2](#) se pueden apreciar los resultados para estos arcos en comparación con el arco de medio punto.

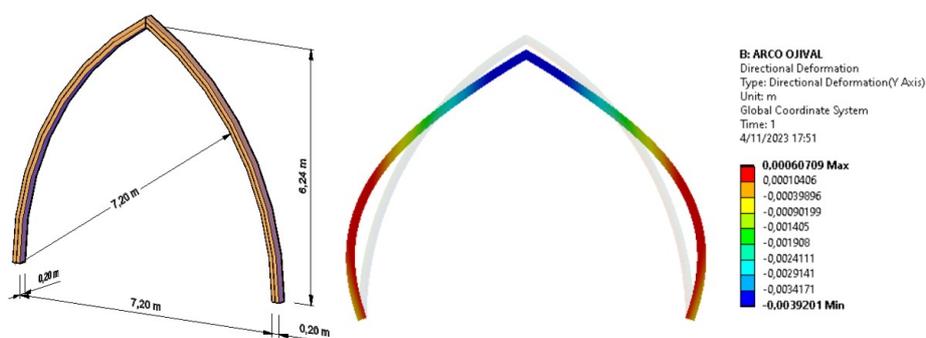


Figura 3: Geometría y deformada (x100) para el arco ojival.

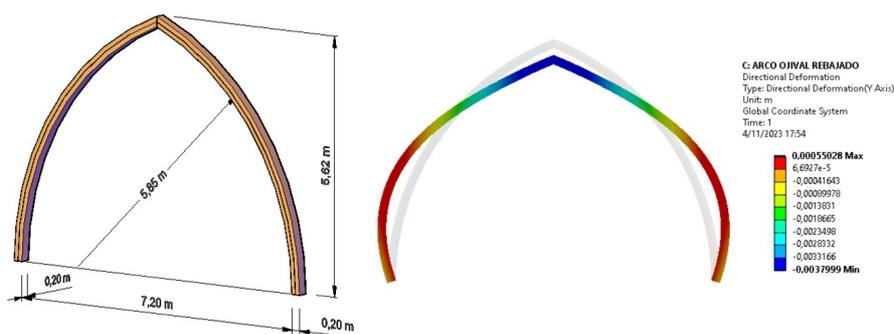


Figura 4: Geometría y deformada (x100) para el arco ojival rebajado.

Tipo de arco	H [N]	Despl. [m]	En clave:	
			$\sigma +$ [Pa]	$\sigma -$ [Pa]
Medio Punto	1305,80	-4,32E-03	4,90E+05	-5,38E+05
Ojival	1073,60	-3,92E-03	2,31E+05	-9,41E+04
Ojival Rebajado	1119,00	-3,80E-03	3,65E+05	-1,52E+05

Tabla 2: Resultados del análisis computacional para los distintos tipos de arco.

Se observa en los resultados que el arco ojival demostró una mejor capacidad para

transmitir el empuje lateral, lo que permite la construcción de vanos más amplios y muros más altos. Además, en términos de deformación, tanto el ojival como el ojival rebajado presentan menos desplazamiento vertical en la clave en comparación con el arco de medio punto.

### 3 ANÁLISIS DE BÓVEDAS DE MAPOSTERÍA.

#### 3.1 Lamina cilíndrica

A diferencia de los arcos, las bóvedas son estructuras que adquieren un carácter tridimensional. Se adopta para esto una geometría en corte como la que puede apreciarse en la [Figura 1](#), y con un desarrollo longitudinal en el eje Z (Sistema de referencia en [Figura 5](#)) de 16 metros. Los apoyos para esta primera estructura se consideran restringiendo los desplazamientos en las 3 direcciones para la cara inferior de los tímpanos que se colocan para cerrar la estructura de manera transversal, en planos paralelos al XY. Este tipo de estructura es un caso clásico, cuya resolución analítica puede encontrarse en la bibliografía ([Huerta 2020](#)), y se utilizará para la comparación con los resultados numéricos. Posteriormente, se analizarán formas más complejas ya solo desde el punto de vista numérico.

En la [Figura 5](#) se puede apreciar una perspectiva de la estructura mallada, donde observa uno de sus tímpanos, en cuya cara inferior fueron restringidos los desplazamientos. También en la [Figura 5](#), puede apreciarse el mapa de colores de desplazamientos totales. En la [Tabla 3](#) se puede apreciar los resultados analíticos y numéricos en términos de las tensiones normales en la clave para la dirección transversal  $\sigma_x$  y longitudinal  $\sigma_z$ , encontrando una muy buena correlación entre ambos casos.

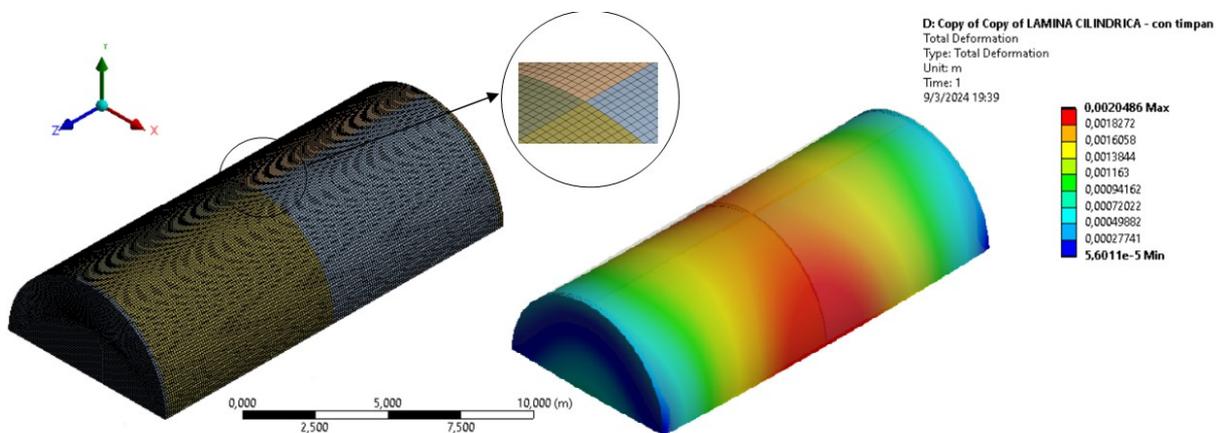


Figura 5: Mallado y mapa de desplazamientos lámina cilíndrica.

Tensiones	Analítico	Computacional
$\sigma_x$ [Pa]	-6,53E+04	-6,55E+04
$\sigma_z$ [Pa]	-3,05E+05	-3,03E+05

Tabla 3: Comparación analítica vs. Computacional de la lámina cilíndrica.

#### 3.2 Bóvedas de secciones transversales ojivales

En esta sección se analizaron de manera numérica bóvedas con sección transversal como

las que se muestran en la [Figura 4](#) (ojival y ojival rebajada) y con un desarrollo longitudinal de 16 metros. Se cerraron los extremos con tímpanos, y se apoyaron restringiendo los desplazamientos de los 4 bores inferiores. Se incluyó también en el análisis la lámina de la [Sección 4.1](#), a la cual se le incorporó la condición de apoyo antes citada y llamaremos bóveda de medio punto.

En la [Figura 6](#), puede apreciarse el mallado, las máximas tensiones principales y las direcciones de los vectores de tensiones principales para los distintos casos analizados. En la [Figura 7](#), pueden observarse las secciones transversales deformadas, el máximo valor de desplazamiento obtenido y las zonas con tracción y compresión para los distintos casos.

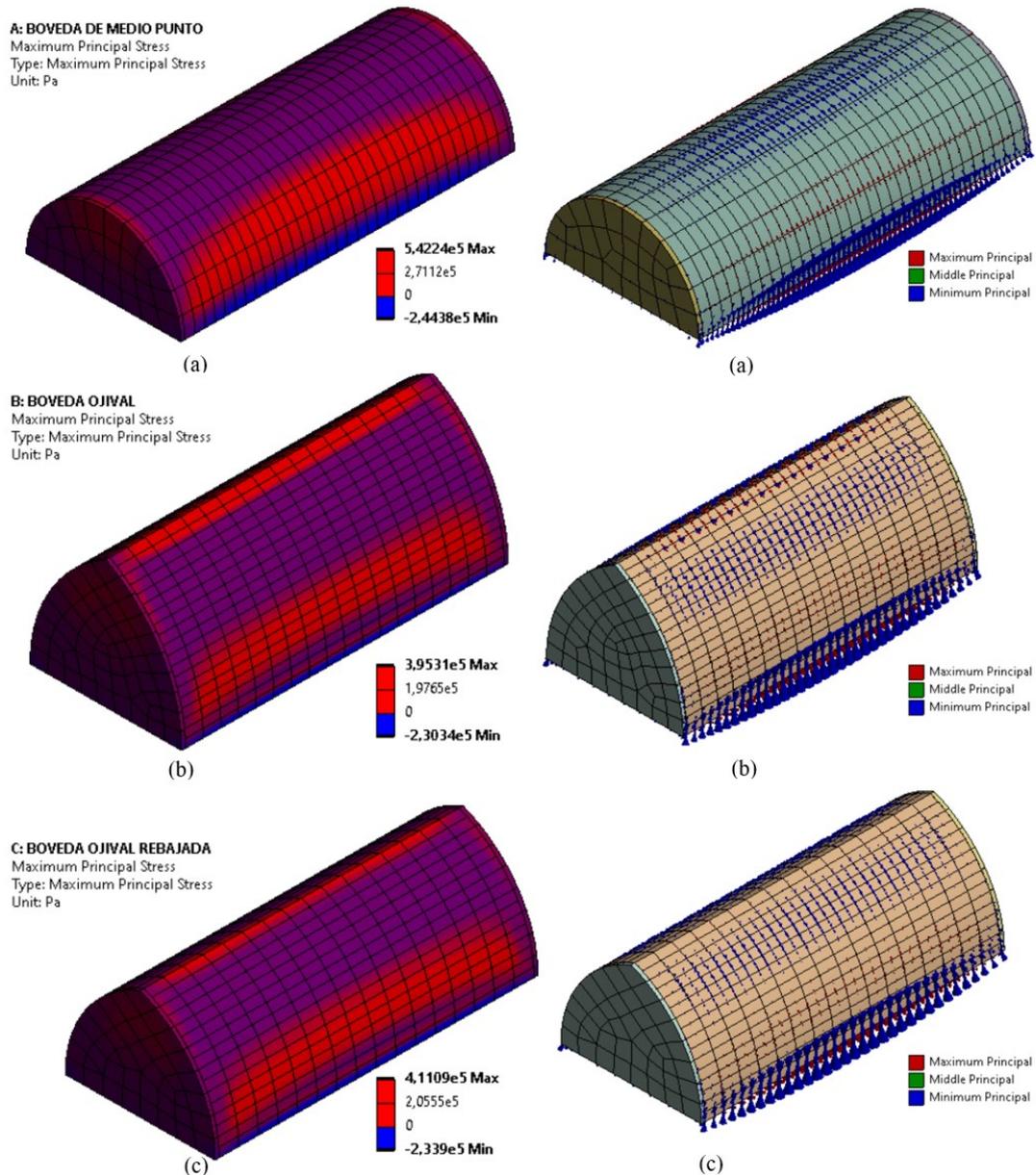


Figura 6: Máxima tensiones principales y vectores de tensiones principales: (a) Bóveda de medio punto; (b) Bóveda ojival; (c) Bóveda ojival rebajada.

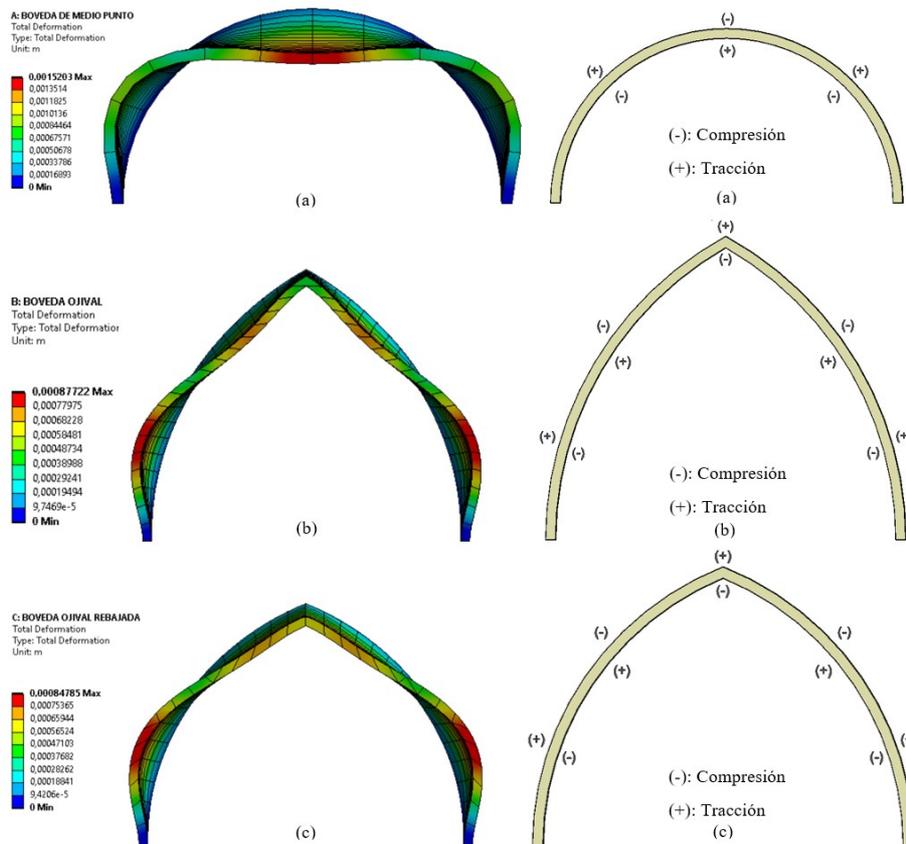


Figura 7: Deformada (x100) con desplazamientos totales y zonas de tracción y compresión: (a) Bóveda de medio punto; (b) Bóveda ojival; (c) Bóveda ojival rebajada.

En base a estos análisis realizados se pudo observar que la bóveda de medio punto experimentó compresión en la parte superior de la clave y tracción en la parte inferior. En cambio, tanto la bóveda ojival como la ojival rebajada presentaron tracción en la parte superior de la clave (Figura 7). Este fenómeno resaltó diferencias fundamentales en la distribución de tensiones entre los distintos tipos de bóvedas, influenciado por sus formas geométricas específicas.

Adicionalmente, se notó que a medida que los vectores principales se acercaban a los extremos en los tres tipos de bóvedas, experimentaban un cambio de dirección (Figura 6). Este fenómeno puede atribuirse a la presencia de los tímpanos, que actúan como perturbaciones en la distribución de tensiones a lo largo de la bóveda.

En cuanto a la deformación total, las tres bóvedas exhibieron un desplazamiento vertical en la clave, seguido por un desplazamiento hacia afuera a medida que se acercan a los extremos. Este desplazamiento lateral resultó ser más pronunciado que el anterior. Aunque las formas generales de deformación fueron similares en las tres bóvedas, variaban en cuanto a magnitud. Se observó un desplazamiento superior en la bóveda de medio punto, seguido por la bóveda ojival, y finalmente, en menor medida, en la bóveda ojival rebajada (Figura 7).

#### 4 CASO DE ESTUDIO

En esta sección se buscará analizar y comprender el estado tensional y de fisuración de la bóveda de mampostería presente en la Sacristía del Templo de San Francisco de la ciudad de San Miguel de Tucumán.

La estructura principal del recinto está constituida por muros de mampostería portante de

ladrillos macizos de 1,00 a 1,20 m de espesor. Internamente el techo posee una bóveda de mampostería de ladrillo conformando un esquema de arco de dos centros cerrando una bóveda esquifada. En el centro posee un lucernario circular con una torre de ventilación. Mas detalles sobre las características del templo pueden encontrarse en [Candelario \(2020\)](#). Cabe aclarar que el lucernario antes mencionado, no fue modelado, y se incluyó en el modelo como una carga.

El recinto presenta un estado importante de agrietamiento que permitiría deducir la forma en que se mueve la edificación debido a los asentamientos diferenciales de los muros. Este patrón de agrietamiento se presenta tanto en los muros como en la bóveda de la cubierta. En la [Figura 8](#) se muestran fotos de las fisuras que pueden apreciarse en el interior de la sacristía. En la [Figura 9](#) se muestra una maqueta 3d con la geometría de la bóveda a analizar en este trabajo.



Figura 8: Patrón de grietas sobre pared Norte, sector Este

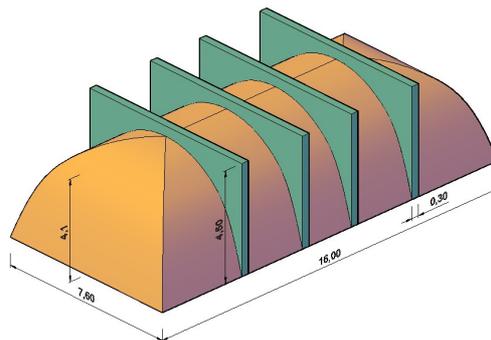


Figura 9: Geometría de la bóveda de la Sacristía de San Francisco.

#### 4.1 Descripción de los modelos realizados

Para analizar el comportamiento de esta estructura, se hicieron dos tipos de modelos. En primer lugar, se buscó explicar el comportamiento de la estructura sin problemas en su fundación. Para esto, se hizo un modelo solo de la bóveda con contrafuertes para poder estudiar cual es el efecto de estos últimos en la estructura. Luego, se realizó un modelo en que se aplicó un descenso de apoyo en una esquina, coherente con el patrón de fisuras que se

aprecia en la estructura.

Para estos modelos se utilizó un comportamiento de material elastoplástico, en el cual, al llegar el estado tensional a la superficie de fluencia, el comportamiento pasa a ser perfectamente plástico. De este modo, el patrón de fisuras que presenta la estructura, se puede presentar mediante el mapa de deformaciones plásticas equivalentes. Como superficie de fluencia se utilizó la de Menetrey Willam, el cual se encuentra disponible en la librería de ANSYS. Detalles sobre este modelo se pueden obtener en Dmitriev et al. (2020). Los parámetros adoptados se hicieron en base a las recomendaciones de Lourenco (1996) para esta superficie son:

- Resistencia a compresión= 7Mpa.
- Resistencia a tracción= 0,10 Mpa.
- Resistencia Biaxial= 9 Mpa.
- Ángulo de dilatación=  $10^\circ$ .

Para estos modelos, se restringieron los desplazamientos en las 3 direcciones de los 4 bordes inferiores. En el caso de los modelos con contrafuerte, se restringió la componente de desplazamiento perpendicular a la cara externa de los mismos, pues estos se encuentran vinculados a un muro perimetral. En el caso en el que se consideró el descenso de esquina, simplemente se optó por liberar los desplazamientos en la zona de la base de la bóveda, lo cual se aprecia en la vista en planta en la [Figura 10](#).

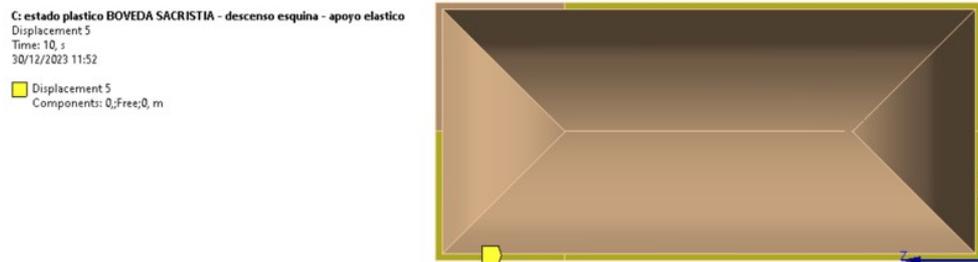


Figura 10: Condiciones de borde de descenso de esquina.

En cuanto a las cargas gravitatorias que se introdujeron al modelo, aparte de peso propio, se incorporó una carga vertical uniformemente distribuida que surgió de un análisis de cargas en el que se consideraron: material de rellenos sobre la bóveda, peso de elementos de la cubierta (correas, chapas), peso del lucernario. También se consideró como parte de esta carga uniformemente distribuida al peso del lucernario. Para esta carga se determinó un valor total de 6183Pa.

## 4.2 Resultados obtenidos

En primer lugar, se exhibirán los resultados de los modelos que no consideran el descenso de apoyo en la esquina. Los resultados se muestran para la estructura con y sin contrafuertes. En la [Figura 11](#) se aprecian los mapas de deformaciones plásticas. En la [Figura 12](#) se puede observar los desplazamientos totales, el mapa de máxima tensión principal y los vectores principales de tensiones.

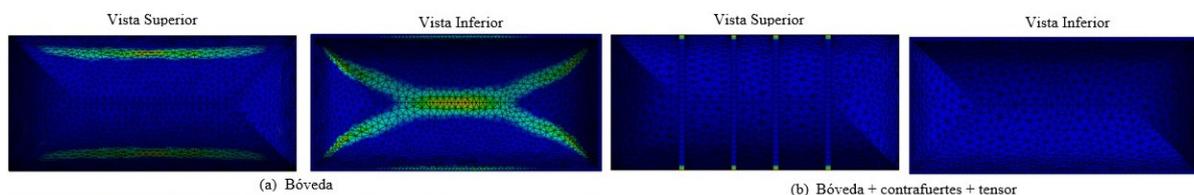


Figura 11: Vista superiores e inferiores del mapa de deformaciones plásticas

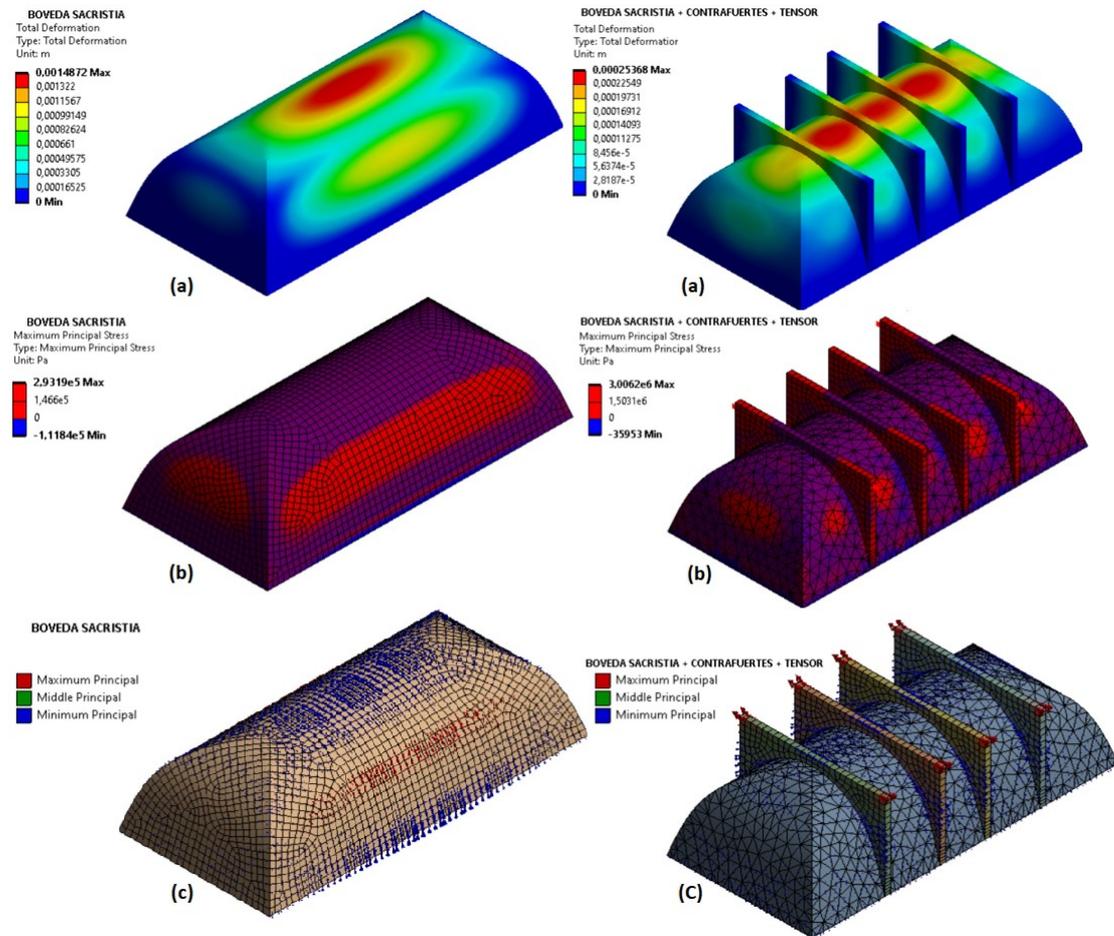


Figura 12: Izquierda, bóveda sin contrafuertes. Derecha, bóveda con contrafuertes (a) mapa de desplazamientos totales. (b) mapa de máximas tensiones principales. (c) vectores principales de tensiones.

Los modelos analizados evidencian un comportamiento esperado en cuanto a las tensiones máximas principales. Se constató que en la parte superior exterior de la bóveda se generaban esfuerzos menores, mientras que las tensiones aumentan hacia los laterales exteriores. En cuanto a los contrafuertes las tensiones decrecen hacia el centro de la bóveda (Figura 12b)

En el mapa de vectores principales de tensiones se observa que los contrafuertes están sometidos a tracción (Figura 12c).

Además, se destaca que el desplazamiento vertical central de la bóveda disminuye a cuando se incorporan los contrafuertes (Figura 12a). Es notable también, desde el punto de vista de las deformaciones plásticas, que la inclusión de los contrafuertes elimina las mismas para el estado de cargas gravitatorias (Figura 11).

Finalmente, Se analiza el modelo de la bóveda en el cual se introdujo el descenso de apoyo que se muestra en la Figura 10. En la Figura 13 se muestran dicho mapa para la estructura con contrafuertes. En la Figuras 14 se muestra el mapa de deformaciones plásticas en superposición con las fisuras relevadas en la estructura real.

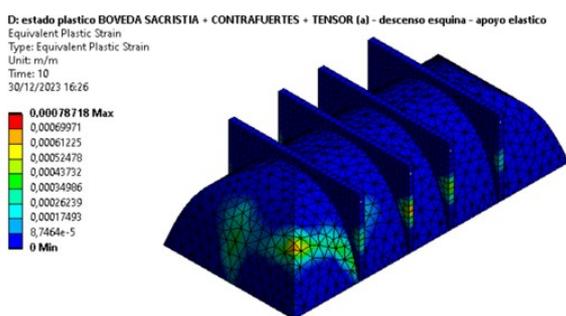


Figura 13: Deformación Plástica Equivalente.

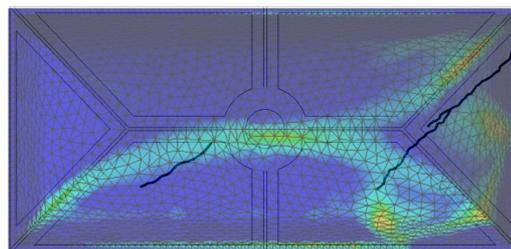


Figura 14: Fisuras relevadas vs numéricas.

## 5 CONCLUSIONES

Se constató, de acuerdo con la comparación de los tres tipos de arcos analizados, – el de medio punto, el ojival y el ojival rebajado – que a medida que la forma de estos se asemejó más a la línea de empujes, experimentaron menor sollicitación y deformación, convirtiéndose así en opciones más eficientes desde el punto de vista estructural. En este sentido, El arco ojival demostró una mejor capacidad para transmitir el empuje lateral, lo que permite la construcción de vanos más amplios y muros más altos. Además, tanto el ojival como el ojival rebajado presentaron menor desplazamiento vertical en la clave en comparación con el arco de medio punto.

Se evidenciaron las diferencias en la distribución de tensiones y deformaciones de los tres tipos de bóvedas analizadas, la de medio punto, la ojival y la ojival rebajada, debido a sus formas geométricas y a la influencia de los tímpanos. La bóveda de medio punto fue la que mostró compresión en la parte superior de la clave y tracción en la parte inferior. La bóveda ojival rebajada fue la que tuvo tracción en la parte superior de la clave y menor deformación en general. La bóveda ojival se ubicó en un punto intermedio entre las otras dos, con una distribución de tensiones y deformaciones más equilibrada.

Se constató que una de las principales causas de fisuración en la bóveda del caso de estudio se debe al asentamiento diferencial que se produce en una de las esquinas, lo que se observó en la distribución de deformaciones plásticas detectadas. Para esta bóveda, se constató también que la presencia de los contrafuertes contribuye positivamente en el funcionamiento de la estructura, tomando tracciones y evitando fisuración en la bóveda.

## REFERENCIAS

- Candelario, S. Innovaciones en la iglesia y convento de San Francisco, Tucumán, Argentina (fines del S XVIII-Inicios del S XX). *Revista de Arqueología Histórica Argentina y Latinoamericana* 14 (1): 1-34. Buenos Aires. Argentina. 2020.
- Dmitriev, A., Novozhilov, Yu., Mikhalyuk, D., Lalin, V., Calibration and Validation of the Menetrey-Willam Constitutive Model for Concrete. *Construction of Unique Buildings and Structures*; Volume 88 Article No 8804. doi:10.18720/CUBS.88.4, 2020.
- Huerta Fernández, S. Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica. *Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid*, Madrid. 2020.
- Lourenco, P. B. Computational strategies for masonry structures. Tesis. *University of Porto, Portugal*. 1996.